

Способы изготовления самонесущих рентгеношаблонов

А. Н. Генцелев, С. Г. Баев

Описаны конструкция и способы изготовления самонесущих высококонтрастных в рентгеновском спектральном диапазоне длин волн ($\lambda \approx 0,6 \div 14 \text{ \AA}$) рентгеношаблонов, являющихся инструментом для формирования высокоаспектных резистивных топологий толщиной до 1 мкм и более, причем как из позитивных, так и негативных рентгенорезистов. Подробно описаны два способа изготовления: на основе плазмохимического травления и на основе лазерной резки. Были изготовлены образцы обоими этими способами и проведено их сравнение. Выполненная работа показывает, что таким образом можно изготавливать самонесущие высококонтрастные рентгеношаблоны и LIGA-шаблоны из промышленно выпускаемых фольг тяжелых металлов, таких как тантал и др. с минимальными топологическими размерами до 15 мкм. Способ лазерной резки с использованием мощного фемтосекундного лазера более оперативен и требует существенно меньшей технологической подготовки и меньшего количества операций для его реализации.

Ключевые слова: рентгеношаблон, LIGA-шаблон, плазмохимическое травление, лазерная микрообработка, лазерная резка, LIGA-технология, контраст рентгеношаблона, резистивная маска, аспектное отношение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-75-82

Введение

Наблюдаемый в последние десятилетия бурный рост производства изделий микросистемной техники (МСТ) и микроэлектромеханических систем (МЭМС) базируется на новых литографических технологиях, обеспечивающих формирование трехмерных, т. е. 3D-структур и позволяющих внедрять активное использование классических принципов

механики, оптики, акустики, электротехники, теплотехники, химии и биологии, интегрируемых в конструктивные решения на микроуровне с широким использованием материаловедческой и технологической баз микро- и оптоэлектроники, а в последнее время и биотехнологии. Есть даже мнение [1], что микромашины, механизмы и приборы микросистемной техники по стоимости, надежности, ресурсу, массогабаритным показателям, энергопотреблению, широте и эффективности применения настолько превосходят традиционные аналоги, что созданная без использования микросистемной техники продукция специального и гражданского назначения в ближайшем будущем может оказаться неконкурентоспособной.

Одной из основных особенностей используемых современных литографических технологий является существенное увеличение аспектного отношения (АО), т. е. отношение толщины формируемой резистивной маски к наименьшему латеральному размеру её

Генцелев Александр Николаевич¹, вед. инженер.
E-mail: ang1209@mail.ru

Баев Сергей Геннадьевич², главный специалист-технолог.

E-mail: baev@iae.nsk.su

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН.
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2021 г.

© Генцелев А. Н., Баев С. Г., 2022

топологических элементов, в результате чего «...толщина микромеханических элементов, в отличие от композиций классической микроэлектроники, может превосходить их латеральные размеры в плоскости...» [1], причем в десятки и сотни раз.

Данная статья посвящена описанию найденных и опробованных на практике способов изготовления высококонтрастных самонесущих рентгеношаблонов из промышленно выпускаемых фольг тяжелых металлов, таких как вольфрам (W), тантал (Ta) и др. с минимальными топологическими размерами до 15 мкм, что позволит существенно увеличить диапазон возможностей изготавливаемых посредством рентгенолитографии приборов варьируя их размеры, что выразится в физических параметрах этих устройств.

Постановка задачи

Проведем сравнение возможностей фотолитографии и рентгеновской литографии. Оценка величины пространственного разрешения – δ для глубокой контактной фотолитографии при толщине резиста ~ 1 мкм с учетом длины волны экспонирующего излучения (ЭИ), равной $\lambda \approx 4000 \text{ \AA}$ (в обеспечение нужной глубины проникновения излучения в резист), рассчитанная по формуле, как удвоенное размытие изображения края литографической маски в приближении Френеля, составит $\delta \approx 30$ мкм. Такое литографическое разрешение было практически продемонстрировано в работе [2], в которой была получена резистивная маска из негативного резиста SU-8 толщиной ~ 1 мкм с латеральными размерами элементов ~ 40 мкм (АО ~ 25). Разумеется, уменьшая толщину резиста, можно формировать рельеф с меньшими топологическими размерами, например, структуры шириной ~ 5 мкм в резисте толщиной ~ 70 мкм (АО ~ 14) [3].

В работе [4] была продемонстрирована возможность изготовления из SU-8 посредством рентгенолитографии резистивных структур высотой ~ 930 мкм, диаметром ~ 130 мкм (АО ~ 7), расстояние между элементами ~ 40 мкм; в работах [5, 6] были получены в заготовках из органического стекла марки ТОСН толщиной 1 мм сеточные псевдометал-

лические микроструктуры (ПММС) с шириной перемычек ~ 70 мкм (АО $\sim 14,3$). В работе [7] были получены структуры высотой $400 \div 480$ мкм с латеральными размерами $4 \div 8$ мкм (АО $\sim 60 \div 100$), и это явно продемонстрировало, что потенциальные возможности глубокой рентгенолитографии превосходят возможности глубокой контактной фотолитографии, поскольку длина волны рентгеновского экспонирующего излучения (ЭИ) примерно в 1000 раз короче длин волн видимого спектра, используемого в глубокой фотолитографии. Таким образом, применяя глубокую рентгенолитографию, можно получать приборы и устройства с новыми свойствами и иными физическими параметрами, в частности, изготавливать планарные ПММС [5, 6] и металлические микроструктуры (ММС) [8] субволновой топологии для управления электродинамическими характеристиками пучков электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов с варьированием размеров ячейки, ширины перегородки структуры и её толщины в существенно более широком диапазоне, чем это делалось ранее.

Вопрос о разрешающей способности рентгенолитографии в области жесткого спектра ($\lambda \leq 3 \text{ \AA}$), излучение которого обеспечивает проведение глубокой литографии, пока окончательно не определен из-за отсутствия общепринятой математической модели описания диссипации энергии экспонирующих фотонов в резисте [9–13]. Оценка величины литографического пространственного разрешения, выраженной в мкм, может быть произведена по общей формуле:

$$\delta(\lambda, z) \approx 2 \times (\Delta_{\text{dif}}^2 + \Delta_e^2)^{1/2} = \left((2 \times \Delta_{\text{dif}})^2 + (2 \times \Delta_e)^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где Δ_{dif} – вклад, обусловленный дифракцией ЭИ и равный $\Delta_{\text{dif}} \approx (z \times \lambda / 2)^{1/2}$ (z – зазор между шаблоном и обрабатываемой подложкой, измеряемый в см, а λ – в \AA), а $\Delta_e(\lambda)$ – вклад, обусловленный пробегом вторичных электронов. Формула (1) верна и для фотолитографии, и для рентгенолитографии при использовании высокоразрешающих резистов и точечных источников ЭИ. В настоящее время нет полного согласия относительно оценки $\Delta_e(\lambda)$ и существует несколько подходов к его расчету.

На рис. 1 приведены графики литографического разрешения для глубокой рентгенолитографии, где величина $\Delta_e(\lambda)$ рассчитана по двум разным формулам:

$$\Delta_e(\lambda) = 0,35 / (\rho \times \lambda); \quad (2)$$

$$\Delta'_e(\lambda) \approx k'_\lambda \times 0,35 / (\rho \times \lambda), \quad (3)$$

где $k'_\lambda \approx 0,46$ при $23,3 \text{ \AA} \geq \lambda \geq 5 \text{ \AA}$ и $k'_\lambda \approx 0,93 \times (\lambda/12,4)^{3/4}$ при $5 \text{ \AA} \geq \lambda \geq 0,6 \text{ \AA}$.

Формула (2) приведена в работе [11], а формула (3) получена на основе аппроксимаций, приведённых в работах [12, 13], и их пролонгации в область жесткого спектра (подробнее [14]).

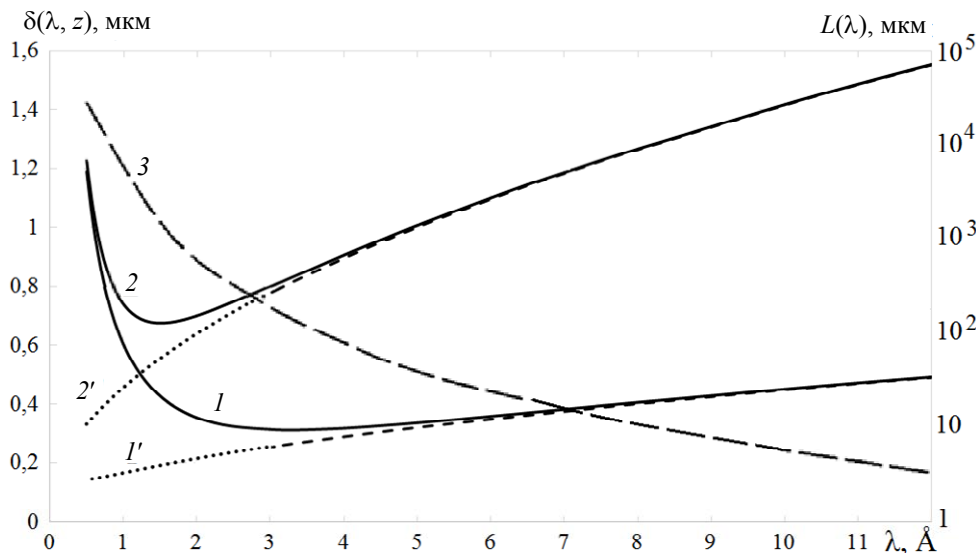


Рис. 1. Спектральная зависимость достигаемого при реализации рентгенолитографии пространственного разрешения – $\delta(\lambda, z)$, рассчитанная для двух значений зазора. При этом размытие изображения, обусловленное пробегом вторичных электронов – $\Delta_e(\lambda)$, оценено по двум различным формулам: по формуле (2) для зазора $z = 0,01 \text{ см}$ – линия 1, $z = 0,1 \text{ см}$ – 2; и по формуле (3) $z = 0,01 \text{ см}$ – линия 1'; $z = 0,1 \text{ см}$ – 2'. Также добавлен график спектральной зависимости глубины проникновения излучения в ПММА – $L(\lambda)$ в виде линии 3, шкала справа

Следует отметить, что для изготовления ПММС с использованием самонесущего рентгеношаблона должен использоваться позитивный рентгенорезист типа ПММА, а для изготовления ММС – негативный рентгенорезист SU-8 или его аналоги. Особенности работы с негативным резистом SU-8 описаны в инструкциях по его использованию и в работах [2, 3]. Специфической его чертой является образование приповерхностной нерастворимой резистивной «корочки», «пороговая доза ее образования $\sim 2 \text{ Дж/см}^3$, что составляет $\leq 5\%$ от типичной дозы ($\sim 40 \div 100 \text{ Дж/см}^3$) на поверхности резиста» [3]. Это обстоятельство приводит к необходимости использования высококонтрастных фото- и рентгеношаблонов при работе с ним, т. е. интенсивность в первом дифракционном максимуме должна быть меньше 5% от падающей интенсивности, из чего следует, что контраст шаблона должен

быть > 400 при использовании ЭИ, близкого к монохроматическому, и > 20 в случае, если ЭИ имеет широкий спектральный диапазон.

Конструкция рентгеношаблонов и технология их изготовления

Конструкции самонесущих металлических рентгеношаблонов и основные способы их изготовления преимущественно из фольг тяжелых металлов приведены в прежних наших работах [5, 6, 8], а именно: посредством плазмохимического травления (ПХТ) и посредством лазерной резки.

Технологическое оборудование, реализующее ПХТ, в настоящий момент является самым распространённым, поскольку обеспечивает компромисс между анизотропией, селективностью, скоростью травления и равномерностью. В работе [8] описан способ

изготовления самонесущего рентгеношаблона из промышленно выпускаемой вольфрамовой фольги путём её травления в плазме BCl_3 через резистивную маску из SU-8 толщиной 95 мкм, сформированную глубокой контактной фотолитографией на оборудовании и методом, описанными в работе [3]. Недостаток конкретного приведённого подхода реализации данного способа в том, что резистивная маска травится быстрее, чем вольфрамовая фольга, примерно в 4,5 раза. Для преодоления данного недостатка было предложено формировать защитную маску при помощи известных способов, включающих контактную фотолитографию, из алюминия (Al) на поверхности танталовой (Ta) фольги и производить травление в плазме фторида азота (NF_3). Выбор Al обусловлен тем, что он не имеет летучих при комнатной температуре фторидов. Операции ПХТ производились на установке Plasmalab 80 Plus с источником индуктивно-связанной плазмы (ICP), применяя циклический режим с чередованием операций травления и охлаждения таким образом, чтобы температура столика в начале каждого очередного цикла составляла $\sim 5^\circ\text{C}$. Следует отметить, что перед травлением фольга обязательно должна быть распрямлена и зафиксирована на шайбе, выполненной из металла с хорошей теплопроводностью (например, меди) путём «приклейки» металлом галлием (Ga, температура плавления $T \approx +29,8^\circ\text{C}$). В противном случае, из-за неоднородного распределения температуры на поверхности фольги и в силу различия локальных условий её охлаждения, те места, где между фольгой и шайбой образуется зазор, будут греться ещё сильнее, что приведёт к ещё большему короблению фольги, к неоднородности её травления и к последующим необратимым изменениям формируемой структуры (к пережиганию тонких перемычек).

Режим травления танталовой фольги: давление ~ 10 мТорр, скорости подачи газов: NF_3 – $30 \text{ см}^3/\text{мин}$, аргона (Ar) – $10 \text{ см}^3/\text{мин}$; подводимые мощности: ВЧ-генератор плазмы – $\text{RF} = 100 \text{ Вт}$, ICP = 600 Вт , скорость травления тантала $\sim 1 \text{ мкм}/\text{цикл}$ (цикл: травление – 1 мин, охлаждение – 3 мин). Во время травления к образцу подводится значительная мощность ($\sim 700 \text{ Вт}$), и он греется, соответственно, под-

нимается температура столика, контролируемая датчиком температуры, которая не должна превышать $\sim 20^\circ\text{C}$. На стадии охлаждения она снижается до $\sim T = 5^\circ\text{C}$, и эта температура является исходной для старта нового цикла. Скорость травления защитной маски из Al (исходной толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$) $\sim 1 \text{ нм}/\text{цикл}$ (т. е. ~ 1000 раз меньше, чем скорость травления Ta).

Фрагмент полученной сеточной структуры, приведённый на рис. 2, а, свидетельствует о высоком качестве переноса топологии посредством вышеописанного способа, которым, по всей видимости, можно изготавливать топологии и с меньшими размерами. Но изготовление подобным способом сеточной структуры из промышленно выпускаемой вольфрамовой фольги без её дополнительной обработки затруднено по причине значительной шероховатости её поверхности.

Освобождение перфорированной танталовой фольги от металлической шайбы производилось путем растворения связующего металла Ga в слабо концентрированном ($\sim 10\text{--}20\%$) водном растворе соляной кислоты – HCl (путем окисления Ga и растворения его соли – GaCl_3). После чего перфорированная фольга сушилась, распрямлялась и крепилась в опорном кольце, обеспечивающем её лучшую сохранность при последующей эксплуатации.

В работах [5, 6] описан способ изготовления посредством лазерной резки самонесущих рентгеношаблонов из фольг толщиной $\sim 50 \text{ мкм}$: из латуни (промышленно выпускаемая фольга) и из свинца (Pb) (сформирована с применением вальцов). Типичные размеры узких перемычек были на уровне толщины фольги, а шероховатость кромки реза $\pm 2\div 3 \text{ мкм}$.

Основные параметры установок лазерной резки приведены в таблице, аналогичной приведённой в работе [6]. Таблица дополнена параметрами новой установки, оснащенной фемтосекундным лазером [15] и имеющей полное наименование: «Лазерная рабочая станция для микрообработки материалов на основе фемтосекундного импульсно-периодического лазера Pharos-20-1030», которая обозначена в таблице, как ЛРС ММ. Она по плотности мощности в импульсе превосходит предыдущие аналоги более чем в 1000 раз.

В таблице использованы буквенные обозначения следующих параметров установок: λ – длина волны лазера, N – средняя мощность лазера, t – длительность импульса, w – частота

импульсов, E – энергия в импульсе, d – диаметр перетяжки пучка в фокальной плоскости, P – средняя плотность мощности, σ – средняя плотность мощности в импульсе.

Таблица

Параметры установок лазерной резки

Установка	λ , нм	N , Вт	t , нс	w , кГц	E , мДж	d , мкм	P , Вт/см ²	σ , ГВт/см ²
Vitro US	532	2	10	2	1	15	1,1	55
ЛРС ИАиЭ	1064	10	10	10÷100	0,23	10	2,6÷13	30
ЛРС ММ	1030	1	214×10 ⁻⁶	100	0,01	10	1,3	~60000

Скорость перемещения луча в ЛРС ММ до 1 м/с; для уменьшения зоны термического влияния и увеличения разрешающей способности микрообработки, её проводят в режиме многократного прохода заданного контура. В конкретном случае резки танталовой фольги при формировании сеточной структуры рентгеношаблона (см. рис. 2, б) использовался режим со скоростью перемещения ~140 мм/с и с 50-кратным прохождением заданного контура, что позволило получить перемычки шириной ~15 мкм (т. е. ~0,5 от толщины фольги) с шероховатостью кромки ~1 мкм. Качество резки оценивалось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Если сравнить по СЭМ-фотографиям (см. рис. 2, а, б) достигнутое качество резки с аналогичными результатами, полученными ранее в работах [5, 6], то явно виден прогресс как в существенном уменьшении шероховатости края реза, так и в минимизации размеров формируемой данным способом топологии.

Повышение качества и разрешающей способности формирования топологии рентгеншаблонов методами селективной лазерной микрообработки излучением фемтосекундного лазера является в данном случае следствием изменения механизма взаимодействия излучения с металлами. В случае наносекундной длительности импульсов этот механизм преимущественно тепловой, что приводит к увеличению зоны термического влияния вследствие высокой теплопроводности металлов, и, соответственно, снижению разрешающей способности и качества. При уменьшении длительности импульсов до величин ≤ 10 пс характер взаимодействия излучения с металлами принципиально меняется. Гравирование и резка их происходит в результате взрывного разрушения или абляции за времена, существенно меньшие времени процессов теплопроводности в металлах. В таком режиме зона термического влияния практически отсутствует, и разрешающая способность определяется размером инструмента – сфокусированного лазерного пучка [16].

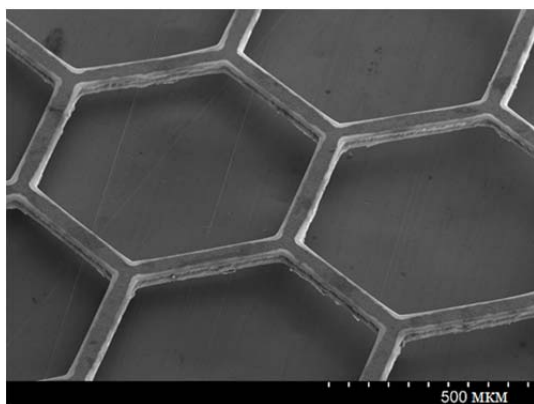


Рис. 2, а. СЭМ-фото (угол наблюдения 45°) фрагмента шаблона, изготовленного путем плазмохимического травления фольги из Та через маску из Al. Толщина структуры ~30 мкм, ширина перемычек ~54 мкм

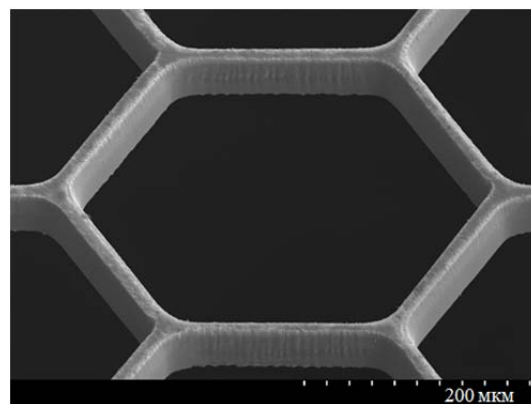


Рис. 2, б. СЭМ-фото (угол наблюдения 45°) фрагмента шаблона, изготовленного путем резки излучением фемтосекундного лазера фольги из Та. Толщина структуры ~30 мкм, ширина перемычек ~15 мкм

Известно, что промышленно выпускаемые фольги сворачиваются в рулоны и продаются в таком виде. Для реализации способа лазерной резки кусок такой фольги определённых размеров крепится в специальном металлическом составном опорном кольце типа пялец, что обеспечивает расположение всех его участков практически в одной плоскости. Непосредственно сразу после окончания резки и проверки её результатов посредством контроля с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), полученный рентгеношаблон готов к своему применению. Следует отметить, что способ лазерной резки с использованием мощного фемтосекундного лазера более оперативен, требует существенно меньшей технологической подготовки и меньшего количества операций для его реализации по сравнению со способом ПХТ, поскольку состоит, по сути, из двух операций, а именно: крепления фольги в опорном кольце и лазерной резки.

Контраст самонесущего перфорированного (со сквозными отверстиями) рентгеношаблона зависит от толщины фольги, от спектра используемого ЭИ и от применяемого рентгенорезиста. Спектральный контраст такого шаблона, выполненного из фольги Та, толщиной 30 мкм, и рассчитанный, как отношение поглощаемой резистом плотности мощности под рентгенопрозрачным и рентгенонепрозрачным участками, изменяется в очень широких пределах от $\sim 1 \times 10^{82}$ (при $\lambda \approx 12,4 \text{ \AA}$) и до $\sim 16,5$ (при $\lambda \approx 0,6 \text{ \AA}$) и удовлетворяет в абсолютном большинстве случаев вышеуказанным требованиям, обусловленным спецификой рентгенорезистов, в частности негативного резиста SU-8.

Таким образом, можно констатировать, что вышеописанные и опробованные на практике способы изготовления высококонтрастных и обеспечивающих работу как с позитивными, так и негативными рентгенорезистами во всём применяемом в рентгенолитографии спектральном интервале $\lambda \approx 0,6 \div 14 \text{ \AA}$ (см. рис. 1) самонесущих рентгеношаблонов с минимальными размерами топологических элементов до $\sim 15 \text{ мкм}$ из промышленно выпускаемых фольг тяжелых металлов, таких тантал и вольфрам, позволят существенно увеличить диапазон линейки изготавливаемых

посредством глубокой рентгенолитографии приборов МТС и МЭМС, в частности ММС и ПММС, применяемых для управления характеристиками пучков электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов. В подтверждение данного тезиса можно привести расчетные графики и экспериментальные измерения, представленные в работе [8], которые демонстрируют усиление эффекта волноводной отсечки с ростом толщины металла, что проявляется в резком возрастании крутизны спектральной характеристики вблизи частоты отсечки экспоненциальным подавлением низких частот».

Заключение

Данная работа демонстрирует, что, применяя известные способы ПХТ и лазерной микрообработки материалов (лазерной резки), можно из промышленно выпускаемых фольг тяжелых металлов, таких как тантал, вольфрам и др., формировать самонесущие структуры, которые могут быть использованы в качестве высококонтрастных рентгено- и LIGA-шаблонов, причём практически во всём спектральном диапазоне задействованном в настоящее время в экспериментальных работах по рентгенолитографии и LIGA-технологии. Достигнутый на настоящий момент уровень минимизации топологических размеров в изготовлении таких структур составляет $\sim 15 \text{ мкм}$ при толщине исходной фольги $\sim 30 \text{ мкм}$ с шероховатостью кромки реза $\sim 1 \text{ мкм}$. Применяя такие шаблоны можно существенно увеличить диапазон линейки изготавливаемых посредством глубокой рентгенолитографии приборов МТС и МЭМС, в частности ММС и ПММС, варьируя как размеры их топологии, так и их толщину. Это проявится в физических параметрах подобных устройств, например, используемых для управления характеристиками пучков электромагнитного излучения терагерцового и субтерагерцового диапазонов.

Следует отметить, что способ лазерной резки с использованием мощного фемтосекундного лазера более оперативен и требует существенно меньшей технологической подготовки и меньшего количества операций для его реализации.

Авторы благодарят Ненашеву Л. А. – сотрудника Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН за проведение ПХТ на оборудовании института.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117060810013-2).

При изготовлении ренттгеношаблонов использовалось экспериментальное оборудование ЦКП ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. // Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база. Электронные компоненты. 2000. № 4. С. 3.
2. Reznikova E. F., Morh J., Hein H. // *Microsystem technologies*. 2005. № 11. P. 282.
3. Генцелев А. Н., Дульцев Ф. Н., Кондратьев В. И., Лемзяков А. Г. // *Автометрия*. 2018. № 2. С. 20.
4. Jae Man Park, Jong Hyun Kim, Jun Sae Han, Da Seul Shin, Sung Cheol Park, Seong Ho Son, Seong Jin Park // *Materials*. 2019. Vol. 12. № 13. P. 2056. <https://doi.org/10.3390/ma12132056>
5. Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Баев С. Г. // *Автометрия*. 2017. № 1. С. 107.
6. Генцелев А. Н., Кузнецов С. А., Гольденберг Б. Г., Баев С. Г., Лоншаков Е. А. // *Поверхность: Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2017. № 7. С. 32.
7. Bogdanov A. L., Peredkov S. // *Microelectronic Engineering*. 2000. Vol. 53. P. 493.
8. Генцелев А. Н., Кузнецов С. А., Дульцев Ф. Н., Гольденберг Б. Г., Зелинский А. Г., Кондратьев В. И., Таныгина Д. С. // *Автометрия*, 2019. № 2. С. 14.
9. Валиев К. А. *Физика субмикронной литографии*. – М.: Наука, 1990.
10. Neureuther A. R. *Investigation by synchrotron radiation* / Ed. H. Winick, S. Doniach. – N.Y.; L: Plenum Press. 1980.
11. Feder R., Spiller E., Topalian J. // *Polym. Eng. Sci.* 1977. Vol. 17. № 6. P. 385.
12. Литвинов Ю. М., Мазуренко С. Н., Матвеев В. М. // *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. 1989. Вып. 6. С. 1498.
13. Мазуренко С. Н., Мануйлов В. В., Матвеев В. М. // *Микроэлектроника*. 1990. Т. 19. Вып. 3. С. 284.
14. Генцелев А. Н. // *Поверхность: Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2022 (в печати).
15. Баев С. Г., Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д., Голошевский Н. В., Горяев Е. П., Кастеров В. В., Максимов М. В., Смирнов К. К. // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2016. Т. 5. № 2. С. 3.
16. Kamlage G., Bauer T., Ostendorf A., Chichkov B. // *Applied Physics A*. 2003. Vol. 77. № 2. P. 307.

PACS: 85.40.Hp

Methods of manufacturing self-supporting X-ray templates

A. N. Gentslev¹ and S. G. Baev²

¹Institute of Nuclear Physics
11 Acad. Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: ang1209@mail.ru

²Institute of Automatics and Electromeasuring
1 Acad. Koptyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received November 18, 2021

The design and methods of manufacturing self-supporting high-contrast in the X-ray spectral wavelength range ($\lambda \approx 0.6\div 14 \text{ \AA}$) X-ray masks are described, which are a tool for the formation of high-aspect resistive topologies with a thickness of up to 1 mm or more, both of positive and negative X-ray resists. Two manufacturing methods are described in detail, namely: on the basis of plasma chemical etching and on the basis of laser micro-processing (laser cutting). Samples were made by both of these methods and their comparison was carried out. The work carried out shows that these methods can be used to produce self-supporting high-contrast X-ray

masks and LIGA-masks from industrially produced heavy metal foils, such as tantalum and other with minimum topological dimensions up to 15 microns. The method of laser cutting using a powerful femtosecond laser is more efficient and requires significantly less technological preparation and fewer operations for its implementation.

Keywords: X-ray mask, LIGA-mask, plasma chemical etching, laser micro-processing, laser cutting, LIGA technology, contrast of the X-ray mask, resist mask, aspect ratio.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-75-82

REFERENCES

1. A. A. Vasil'ev, V. V. Luchinin, and P. P. Mal'cev, *Elektronnyye komponenty*, No. 4, 3 (2000).
2. E. F. Reznikova, J. Morh, and H. Hein, *Microsystem technologies*, No. 11, 282 (2005).
3. A. N. Gentslev, F. N. Dul'tsev, V. I. Kondrat'ev, and A. G. Lemzyakov, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **54** (2), 127 (2018).
4. Jae Man Park, Jong Hyun Kim, Jun Sae Han, Da Seul Shin, Sung Cheol Park, Seong Ho Son, and Seong Jin Park, *Materials* **12** (13), 2056 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12132056>
5. S. A. Kuznetsov, A. N. Gentslev, and S. G. Baev, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **53** (1), 88 (2017).
6. A. N. Gentslev, S. A. Kuznetsov, B. G. Goldenberg, S. G. Baev, and E. A. Lonshakov, *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.*, No. 7, 32 (2017).
7. A. L. Bogdanov and S. Peredkov, *Microelectronic Engineering* **53**, 493 (2000).
8. A. N. Gentslev, S. A. Kuznetsov, F. N. Dultsev, B. G. Goldenberg, A. G. Zelinsky, V. I. Kondratyev, and D. S. Tanygina, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* **55** (2), 115 (2019).
9. K. A. Valiev, *Physics of Submicron Lithograph* (Nauka, Moscow, 1990) [in Russian].
10. A. R. Neureuther, *Investigation of Synchrotron Radiation* / Ed. H. Winick, S. Doniach. (N.Y.; L: Plenum Press, 1980).
11. R. Feder, E. Spiller, and J. Topalian, *Polym. Eng. Sci.* **17** (6), 385 (1977).
12. Yu. M. Litvinov, S. N. Mazurenko, and V. M. Matveev, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3. Mikroelektronika*, No. 6, 1498 (1989)
13. S. N. Mazurenko, V. V. Manujlov, and V. M. Matveev, *Mikroelektronika* **19** (3), 284 (1990).
14. A. N. Gentslev, *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron Neutron Tech.* (in print) (2022).
15. S. G. Baev, V. P. Bessmel'cev, E. D. Bulushev, N. V. Goloshevskij, E. P. Goryaev, V. V. Kasterov, M. V. Maksimov, and K. K. Smirnov, *Interekspo Geo-Sibir'* **5** (2), 3 (2016).
16. G. Kamlage, T. Bauer, A. Ostendorf, and B. Chichkov, *Applied Physics A* **77** (2), 307 (2003).